



Рис. 2. Резонансная диаграмма перепрофилированной РЛ7

Также доказано, что необходимо отстраивать лопатки от резонанса на рабочих режимах для повышения эффективности ОК [3] и, как следствие, повышения эффективности ГТУ в целом.

#### Список использованных источников

1. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин / В. П. Иванов. М. : Машиностроение, 1983. 224 с
2. Уланов А. М. Вибрация и прочность авиационных двигателей и энергетических установок [Электронный ресурс] : электрон, учеб. пособие / А. М. Уланов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. Самара, 2011
3. Бреславский И. Д. Колебания компрессорной лопатки при ее геометрически нелинейном деформировании / И. Д. Бреславский, К. В. Аврамов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2009 . Т. 3. № 7. С. 75–78.

УДК 621.3

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КПД ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ

### EVALUATION OF UNCERTAINTY OF THE ELECTRIC MOTOR EFFICIENCY MEASUREMENT BY THE INPUT-OUTPUT METHOD

Ошурбеков С. Х., Аскеров Д. Р., Казакбаев В. М.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, s.oshurbekov@mail.ru

**Аннотация:** В работе рассмотрен метод определения результирующей погрешности измерения КПД электродвигателя, на основе погрешностей электрической и механической мощностей. Особое внимание уделено определению погрешности момента на валу двигателя, так как она является одной из самых значительных.

**Abstract:** The method of evaluation of the combined measurement uncertainty of the motor efficiency, based on the uncertainties of electrical and mechanical power, is presented. Particular attention is paid to the evaluation of the shaft torque uncertainty as it is one of the most significant.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; МЭК 60034-30; погрешность измерений.

**Key words:** efficient energy use; IEC 60034-30; measurement uncertainty.

С целью сбережения электрической энергии все чаще находят применение электродвигатели с высокими классами энергоэффективности (IE класс, в соответствии с МЭК 60034-30) [1]. При экспериментальном определении IE класса двигателя, который в дальнейшем будет отражать свойства двигателя для конечного потребителя, слишком большая погрешность измерения КПД может привести к неверной энергетической маркировке. Стандарты на измерение КПД двигателей [2] в настоящее время не регламентируют результирующую величину погрешности.

Оценим, с точки зрения влияния на правильность определения IE-класса, погрешность измерения КПД двигателя при применении метода входной и выходной мощности (прямой метод), с помощью средств измерения, удовлетворяющих [2]. Рассмотрим результаты определения КПД в конкретном опыте: испытывался асинхронный двигатель (АД) типа М3АА80С2 в номинальном режиме 1,1 кВт, 3000 об/мин (производитель АВВ, IE3). В составе измерительной установки применялся датчик момента Т20WN, 5 Н·м (производитель НВМ). Под погрешностью понимают возможное отклонение измеренного значения величины от истинного значения, выраженное количественно. Погрешность определяет величину доверительного интервала, в который попадает измеренная величина. Выделяют абсолютные (обозначим как « $\Delta$ ») и относительные погрешности (обозначим как « $\epsilon$ »). По причине возникновения выделяют случайные (стохастические) и систематические (прежде всего, инструментальные и методологические) погрешности, также называемые погрешностями типа А и В, соответственно [3]. Допуская, что величины погрешностей А типа в несколько раз меньше величин погрешностей В типа, при расчете будем учитывать только погрешности В типа. Тогда

погрешность метода входной и выходной мощности зависит только от величин инструментальной погрешности приборов. Абсолютная погрешность измерения КПД в рассматриваемом случае определяется как [3]:

$$\Delta_c(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_2}\right)^2 \cdot \Delta^2(P_2) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_1}\right)^2 \cdot \Delta^2(P_1)} = \sqrt{\left(\frac{1}{P_1} \cdot \Delta(P_2)\right)^2 + \left(\frac{-P_2}{P_1^2} \cdot \Delta(P_1)\right)^2} \quad (2)$$

где  $\eta = P_2/P_1$  - КПД электродвигателя;  $P_1$  и  $P_2$  - входная (электрическая) и выходная (механическая) мощности.

Механическая мощность является произведением момента  $T$  и скорости вращения  $n$ . Учитывая высокую точность современных цифровых датчиков скорости, погрешностью измерения  $n$  пренебрегаем. Погрешность датчика момента складывается из большого числа компонентов. Суммарная абсолютная погрешность измерения момента (в Н·м) может быть определена как [3]:

$$\Delta_{\text{total}} = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_{\text{TK0}}^2 + \Delta_{\text{TKC}}^2 + \Delta_{\text{lh}}^2 + \Delta_{\text{b}}^2 + \Delta_{\text{para}}^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta_C$  – погрешность отклонения чувствительности;  $\Delta_{\text{TK0}}$  - погрешность влияния температуры на нулевой сигнал;  $\Delta_{\text{TKC}}$  - погрешность влияния температуры на чувствительность;  $\Delta_{\text{lh}}$  – погрешность нелинейности и гистерезиса;  $\Delta_{\text{b}}$  – погрешность отклонения повторяемости;  $\Delta_{\text{para}}$  – погрешность паразитных изгибающих моментов. Заметим, что учет всех источников погрешности измерения момента, не представляется возможным ввиду большого их количества и сложности учета [3]. В формуле (3) учтены наиболее значительные из них. Электрическая мощность измеряется трехфазным анализатором мощности с номиналом 1000 Вт (класс точности 0,5; погрешность  $\varepsilon_{\text{эл}}=0,005$ ). В табл. 1 указаны метрологические параметры применяемого датчика момента.

Таблица 1

Технические параметры датчика момента T20WN

Величина	Обозначение	Значение
Номинальный момент,	$M_n$	5 Н·м
Базовая температура,	$T_{\text{ref}}$	23 град
Отклонение чувствительности	$d_C$	0,2 %
Влияние температуры на нулевой сигнал	$\text{TK}_0$	0,1 %
Влияние температуры на чувствительность	$\text{TK}_C$	0,2 %
Нелинейность и гистерезис	$d_{\text{lh}}$	0,1 %
Относительное отклонение повторяемости	$\sigma_{\text{rel}}$	0,05 %
Отклонение показаний при максимальной допустимой паразитной нагрузке	$d_{\text{para}}$	до 1 %

Величина измеренного момента и колебания температуры при проведении опыта составляют соответственно  $M_{ref} = 3,616 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $T_{max} = 25\text{-}30$  град. Скорость ротора:  $n=2964$  об/мин; активная мощность  $P_1=1350,64$  Вт; КПД:  $\eta=0,831$ . Результаты расчета погрешности измерения КПД двигателя, согласно (2) и (3), приведены в табл. 2.

Из результатов расчета видно, что погрешность, вызванная паразитными изгибающими моментами, является наиболее значительной. Другими компонентами формулы (2) можно пренебречь, ввиду их относительной малости. Результат измерения величины КПД:  $0,831 \pm 0,00727$  ( $83,1 \pm 0,7 \%$ ), при граничной величине КПД IE3 класса равной  $82,7 \%$ , оставляет неопределенность относительного действительного IE класса машины (IE2 или IE3). Необходима дальнейшая исследовательская работа по количественному учету величины  $\Delta_{para}$ , в зависимости от точности центровки машин.

Таблица 2

Результаты измерения и расчета

Наименование параметров	Уравнения	Значения
Погрешность отклонения чувствительности, Н·м	$\Delta_C = (d_C / 100) \cdot M_n$	0,01
Погрешность влияние температуры на нулевой сигнал, Н·м	$\Delta_{TK0} = \frac{TK_0}{100} \cdot M_n \cdot \frac{\Delta T}{10}$ , где $\Delta T = T_{max} - T_{ref}$	0,0035
Погрешность влияние температуры на чувствительность, Н·м	$\Delta_{TKC} = \frac{TK_{0C}}{100} \cdot M_{app} \cdot \frac{\Delta T}{10}$	0,005062
Погрешность нелинейности и гистерезиса, Н·м	$\Delta_{lh} = (d_{lh} / 100) \cdot M_n$	0,005
Погрешность отклонения повторяемости, Н·м	$\Delta_{b'} = 2 \cdot M_{app} \cdot (\sigma_{rel} / 100)$	0,003616
Погрешность паразитных изгибающих моментов, Н·м	$\Delta_{para} = 0.5 \cdot (d_{para} / 100) \cdot M_n$	0,025
Суммарная погрешность момента, Н·м	Уравнение (2)	0,028
Относительная погрешность момента, %	$\varepsilon_M = (\Delta_{total} / M_n) \cdot 100$	0,566
Абсолютная погрешность выходной мощности, Вт	$\Delta P_2 = (\varepsilon_M / 100) \cdot P_{2n}$ где $P_{2n} = M_n \cdot \pi \cdot 100$	8,891
Абсолютная погрешность входной мощности, Вт	$\Delta P_1 = P_{ln} \cdot \varepsilon_{эл}$ где $P_{ln} = 1000$	5
Выходная мощность, Вт	$P_2 = M_{app} \cdot n \cdot (100\pi / 3000)$	1122
Абсолютная погрешность КПД	Уравнение (1)	0,00727

#### Список использованных источников

1. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Sokolov I. The Feasibility Study of the Application of a Synchronous Reluctance Motor in a Pump Drive // Proceedings of The IX International (XX All-Russian) Conference on Power Drives Systems (ICPDS' 2016), IEEE. Perm, Russia, Oct. 2016. P. 1-4
2. Specific Test Methods for Determining Losses and Efficiency of Converter-Fed AC Induction Motor. Rotating electrical machines. IEC/TS 60034-2-3:2013. ed. 1.0. Part 2-3. Geneva, Switzerland, November 2013.
3. Kepsu Mika-Markus. Uncertainty of efficiency measurements in electric drives: Master's thesis of Electrical Engineering. Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, 2015. 101 p.

УДК 693

### «ЗЕЛЕНОЕ» СТРОИТЕЛЬСТВО – ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО

#### «GREEN» BUILDING IS FUTURE TECHNOLOGY

Погребняк Т. А., Герасимова Е. С.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, pogrebniakt@gmail.com

Pogrebniak T. A., Gerasimova E. S.

Ural Federal University, Ekaterinburg

**Аннотация:** В работе описывается метод «зеленого» строительства для создания энергоэффективных зданий, снижения теплопотерь и экономии энергии. Дается определение методу «зеленого» строительства. Приводятся основные приемы «зеленого» строительства.

**Abstract:** The «green» building method for creating energy-efficient buildings, reducing heat loss and energy savings is described. The definition of the method of «green» building is given. The basic methods of «green» building are considered.

**Ключевые слова:** зеленое строительство; энергоэффективность; экономия энергии; новые материалы; новые технологии; природные ресурсы; окружающая среда.

**Key words:** green building; energy efficiency; energy saving, new materials; new technologies; natural resources; environment.

Развитие мировой экономики в течение последних десятилетий сопровождалось активным строительством, но в большинстве случаев строительные компании пренебрегают негативным воздействием на окружающую среду в процессе возведения зданий и сооружений. В наши дни